

调亏灌溉对菘蓝光合特性及品质的影响

王玉才, 邓浩亮, 李福强, 王泽义, 张万恒, 黄彩霞, 张恒嘉

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 于2016年在张掖市民乐县益民灌溉试验站开展了菘蓝不同生育期水分亏缺试验研究。在保持苗期和肉质根成熟期充分灌溉的情况下,对菘蓝的营养生长期和肉质根生长期分别进行轻度、中度和重度的水分亏缺处理,并测定菘蓝光合生理指标和品质。结果表明:营养生长期和肉质根生长期的中度和重度水分亏缺对菘蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低程度最为显著,且随着水分亏缺程度越高,降幅越大。WD5处理的菘蓝综合品质最优,其靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量比对照组CK处理分别高出9.1%,5.3%,7.0%,其他处理随着连续生育期的中轻度水分亏缺程度的增加,菘蓝品质有所提高,但是重度水分亏缺(WD3、WD8和WD9)不利于有效成分的积累。因此,膜下滴灌水分调节降低菘蓝光合速率、蒸腾速率和气孔导度,提高了水分利用效率,并且在营养生长期和肉质根生长期的轻中度水分亏缺有助于改善菘蓝品质。

关键词: 水分亏缺; 光合生理特性; 品质; 菘蓝

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0291-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.045

Effect of Regulated Deficit Irrigation on Photosynthetic Physiological Characteristics and Quality of *Isatis*

WANG Yucai, DENG Haoliang, LI Fuqiang, WANG Zeyi,

ZHANG Wanheng, HUANG Caixia, ZHANG Hengjia

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The effects of irrigation schedule on photosynthetic characteristics and quality biological characteristics during different growth stages of *isatisindigotica* were studied in Yimin Irrigation District of Gansu Province in 2016. With the normal water condition in seedling stage and fleshy root maturity stage, the photosynthetic physiological characteristics and quality of *Isatis* were measured under mild, moderate and severe water deficit treatments in vegetative stage and fleshy root growth stage. The results showed that the leaf net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) of *Isatis* were decreased most significantly for Moderate and severe water deficit in vegetative and fleshy root growth stages, and with the higher degree of water deficit, the greater the decrease. The comprehensive quality of WD5 was the best, the Indigo, Indirubin and (R,S)-goitrin contents of WD5 were 9.1%, 5.3%, 7.0% higher than CK respectively, quality of other treatments were improved moderately with the increasing in mild water deficit, but severe water deficit was not conducive to the accumulation of active ingredients. Therefore, water deficit of *Isatis* under mulched drip irrigation reduced P_n , G_s and T_r , improved the water use efficiency, and mild-to-moderate water deficit was helpful to improving the quality of *Isatis*.

Keywords: water deficit; photosynthetic physiological characteristics; quality; *Isatis*

菘蓝(*Isatis indigotica* Fortune)为十字花科植物,以其干燥根和叶入药,分别称板蓝根和大青叶,均为我国传统大宗药材。近年来发现板蓝根、大青叶是广谱植物抗生素,临床用于治疗呼吸、消化和循环系

统各种炎症。在我国西北干旱区,水分是限制农业发展的重要因素,获得较高的作物产量和水资源利用效率已成为人们追求的主要目标。然而,河西中部地区水资源短缺,灌溉方式不合理,导致作物产量与水分

利用效率低,制约了板蓝根产业的可持续发展。国内外大量研究表明,膜下滴灌调亏技术种植作物可获得较高的产量和水分利用效率,同时对作物生物学特性也有重要影响。适度水分亏缺对作物可提高其产量,调亏灌溉的适宜时段一般在作物的早期生长阶段。康绍忠学者对玉米的调亏灌溉研究表明^[1],合理水分亏缺可以提高玉米的产量,并且其他学者研究表明调亏灌溉适宜于果树、小麦、马铃薯、棉花等作物^[2-5]。

目前,利用膜下滴灌调亏灌溉对苕蓝生长、产量和品质的综合研究很少。因此,探讨膜下滴灌调亏对苕蓝生长、产量形成、水分利用的影响及改善品质机理已成为当前研究的热点问题。河西走廊的苕蓝栽培面积迅速扩张,已成为中国苕蓝栽培的主要区域。合理的灌溉方式成为当地主要的农业管理措施之一,其在满足作物正常生长发育的同时,还可以改变土壤结构和理化性质^[6],使土壤微生物、酶活性^[7]等发生改变,进而通过影响作物自身生理过程,提高产量、水分利用效率和品质。

国内学者先后从不同角度开展了调亏灌溉对苕蓝产量的影响研究。李文明等^[8]通过研究不同灌水定额、灌水次数对苕蓝的耗水特征、产量的影响,发现灌溉定额为 2 250 m³/hm²、灌水时间在 7 月上旬至 8 月中旬时,产量最大、效益显著。谭勇等^[9]通过研究不同水分对苕蓝生长发育和主要有效成分的影响,表明当田间最大持水量为 45%~70%时,苕蓝的产量与品质质量可以兼优。然而,上述研究仅针对苕蓝全生育期进行了水分试验,而忽略了不同生育期、不同亏水梯度对生长状况、产量和品质的影响。本研究采用膜下滴灌技术,以河西走廊地区苕蓝为研究对象,探讨不同生育期、不同水分亏缺程度对苕蓝光合特性及各类品质指标的影响规律,以期在高效节水的基础上为西北干旱区苕蓝的规范化种植提供灌溉理论基础,旨在提高水资源利用率的同时,达到增产调质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 4—10 月张掖市民乐县益民灌溉试验站(100°43'E,38°39'N)进行。该试验区属半干旱区,大陆性荒漠草原气候,海拔约为 1 970 m,年均气温 6.0℃,≥0℃积温 3 500℃,≥10℃有效积温 2 985℃,极端最高温度 37.8℃,极端最低温度-33.3℃,年平均日照时数 3 000 h,平均无霜期 125 d。据 1995—2015 年降雨资料,该地区年平均降雨量为 215 mm,降水少且变率大,供需矛盾突出,干旱频繁。试验地土壤为轻壤土,pH 7.22,耕层土壤田间最大持水量为 24%,土壤容重 1.4 g/cm³。试验区地下水位埋深较深,盐碱化影响较小。

1.2 供试材料

供试品种选用甘肃农业大学中草药系自繁的粒大饱满、均匀一致的苕蓝种子,种子纯度 96%,千粒重 9.873 g,发芽率 87.6%,发芽势 46.4%。于 5 月 3 日播种,播种量为 30.0 kg/hm²,播前对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素(N 含量 46%)210 kg/hm²,过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%,S 含量 10%,Ca 含量 16%)340 kg/hm²,源钾(K₂O 含量 25%)270 kg/hm²,所有肥料都作为基肥在播种时一次性施入。灌溉方式采用膜下滴灌。

1.3 试验设计

本试验为单因素随机试验,将苕蓝生育期按其生长特点分为 4 个生育期:苕蓝苗期(5 月 3 日至 6 月 7 日)、营养生长期(6 月 8 日至 7 月 18 日)、肉质根生长期(7 月 19 日至 8 月 28 日)和肉质根成熟期(8 月 29 日至 10 月 13 日),土壤水分设 4 个梯度,分别为充分灌水(F,土壤含水量为田间持水量的 75%~85%)、轻度水分亏缺(L,土壤含水量为田间持水量的 65%~75%)、中度水分亏缺(M,土壤含水量为田间持水量的 55%~65%)和重度水分亏缺(H,土壤含水量为田间持水量的 45%~55%)。共 10 个水分调控处理,其中 CK 为对照处理,每个处理设 3 次重复,共 30 个小区,每小区面积 36 m²(9 m×4 m),采用随机区组设计,有效试验种植面积为 1 080 m²。灌水方法为膜下滴灌,灌水整个生育期内对土壤湿度控制的土层深度为 100 cm,水分控制上、下限范围与区域实际较为吻合。具体试验设计见表 1。

表 1 不同试验处理的土壤含水量 单位:%

处理	苗期	营养	肉质根	肉质根
		生长期	生长期	成熟期
CK	75~85	75~85	75~85	75~85
WD1	75~85	65~75	75~85	75~85
WD2	75~85	55~65	75~85	75~85
WD3	75~85	45~55	75~85	75~85
WD4	75~85	65~75	65~75	75~85
WD5	75~85	65~75	55~65	75~85
WD6	75~85	55~65	65~75	75~85
WD7	75~85	55~65	55~65	75~85
WD8	75~85	45~55	65~75	75~85
WD9	75~85	45~55	55~65	75~85

注:土壤含水量为田间持水率的百分数。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 光合特性 每个生育期在水分亏缺处理后第 7 天进行测定,选取由里至外第 3 片功能叶片中部作为测定部位,用 LI-6400 便携式光合仪在 1 000 μmol/(m²·s)的光子强度下测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等生理参数日变化,各小区测定 5 株,结果取各处理均值。

1.4.2 品质测定 靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含

量均采用高效液相色谱法^[10]测定。

1.5 数据统计分析

利用 EXCEL 2010 对所测数据进行计算,利用 SPSS 19.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理相关数据差异的显著性,Origin 8.0 制图。

2 结果与分析

2.1 叶面积指数

苤蓝的叶面积指数(LAI)在各个生育时期的变化规律为苗期至营养生长期缓慢上升,在肉质根生长期 LAI 增长迅速,肉质根成熟期增长趋于平缓,总体呈现单峰增长曲线(图 1)。由图 1 可知,苤蓝生育期前期各处理叶面积指数呈现出 S 型上升趋势,在肉质根生长期,WD3、WD8 和 WD9 较对照处理 CK 叶面积指数分别降幅较大,分别是 18.2%,18.7%和 21.5%,其他处理均有所下降,下降幅度在 3.8%~15.0%之间,而WD1 处理相比 CK 上升,增加 4.6%;在肉质根成熟期,处理 WD1 和 CK 的叶面积指数最高,WD9 最低。除 WD9 处理的 LAI 高峰值出现在肉质根生长期外,其余处理及 CK 对照的 LAI 峰值均出现在肉质根成熟期,并且在肉质根生长期各处理间的叶面积指数差异逐渐明显,进入肉质根成熟期也会逐渐增加,但增长平缓,表明在中度和重度水分亏缺会使得苤蓝叶面积有所减少,会降低植株间二氧化碳浓度,光合作用降低。

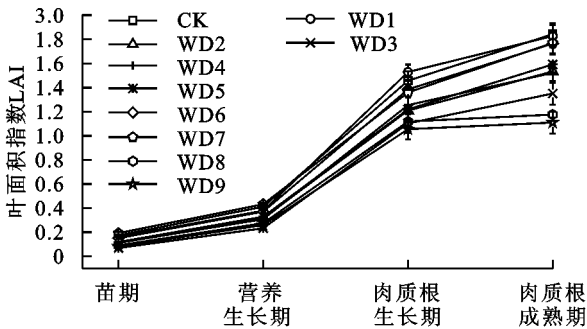


图 1 苤蓝各生育时期叶面积指数变化

2.2 净光合速率

各个处理的苤蓝在苗期和肉质根成熟期净光合速率变化幅度不大,而在营养生长期和肉质根生长期亏水对该生育阶段内净光合速率影响较为显著(图 2)。在营养生长期,中度水分亏缺 WD2 和重度水分亏缺 WD3 的净光合速率分别较 CK 降低 15.8%和 17.1%;WD9 处理较 CK 对照降低 19.1%;其他处理也有所降低,但降低幅度不大,在 3.2%~7.8%之间。在肉质根生长期,处理 WD1 和 WD4 在复水后净光合速率出现复水补偿效应,并且超过 CK,分别达到 19.62,19.84 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理 WD3 复水后,净光合速率较营养生长期有所增加,但增幅不大,并且较 CK 低 14.28%,仅为 16.05 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

肉质根生长期中度水分亏缺 WD5 和 WD7 较 CK 分别均有所下降,下降为 10.13%和 7.88%,但是在肉质根成熟期,处理 WD5 和 WD7 复水后净光合速率有所回升,略低于 CK,仅为 3.82%,4.75%,表明苤蓝在营养生长期和肉质根生长期虽然受水分亏缺影响,但是复水后在肉质根生长期和肉质根成熟期净光合速率有所回升,表现出较强的复水补偿效应。

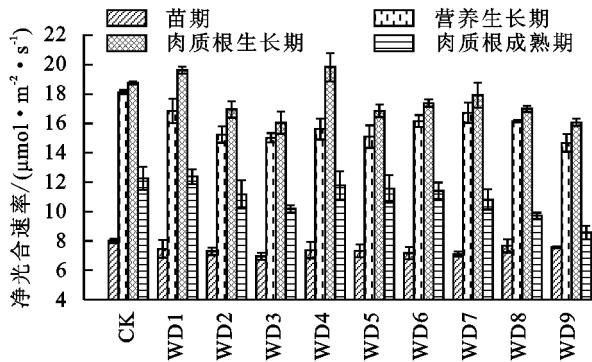


图 2 水分亏缺对苤蓝净光合速率的影响

2.3 气孔导度

气孔是植物叶片与外界环境交换的通道,植物缺水时造成叶肉细胞膨压下降,气孔开度变小。苤蓝各生育期水分亏缺均使叶片气孔导度变小,且随着水分亏缺程度越高,气孔导度越小(图 3)。在营养生长期,轻度水分亏缺 WD1 和 WD4 的气孔导度略高于对照处理 CK,其他中度和重度的水分亏缺的处理均比对照组 CK 降低,其中 WD3、WD8 和 WD9 分别降低 20.0%,20.1%和 25.7%;在肉质根生长期,处理 WD1 和 WD4 在复水后净光合速率出现复水补偿效应,其气孔导度也随之增大,其他中度和重度水分亏缺的处理均比对照组 CK 降低,其中 WD2、WD5、WD6 和 WD7 分别降低 5.8%,6.2%,13.2%和 11.8%。在中度和重度水分亏缺时,随着连续调亏逐渐持续,气孔导度也开始大幅度降低,表明在苤蓝的营养生长期和肉质根生长期的中度和重度水分亏缺会导致其气孔开度变小。

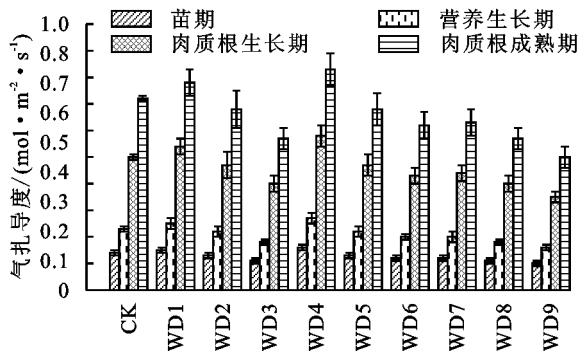


图 3 水分亏缺对苤蓝气孔导度的影响

2.4 蒸腾速率

水分亏缺对苤蓝各生育期叶片蒸腾速率均产生不同幅度影响(图 4)。在苤蓝的营养生长期和肉质根生长期的水分亏缺使其蒸腾速率有降低趋势,并且

随着水分亏缺程度的增加,蒸腾速率呈下降趋势,以营养生长期表现尤为突出。在营养生长期,轻度水分亏缺 WD4 的蒸腾速率略高于对照处理 CK,但无差异;其他轻度、中度和重度的水分亏缺处理的蒸腾速率均比对照组 CK 降低,其中 WD3、WD8 和 WD9 分别降低 10.4%,28.2%和 35.8%;在肉质根生长期,所有处理的蒸腾速率均比对照组 CK 降低,其中以处理 WD8 和 WD9 降低最为显著,比 CK 降低 24.2%和 26.2%。表明在菰蓝的营养生长期和肉质根生长期的中度和重度水分亏缺会使其蒸腾速率有所降低,降低其光合作用。

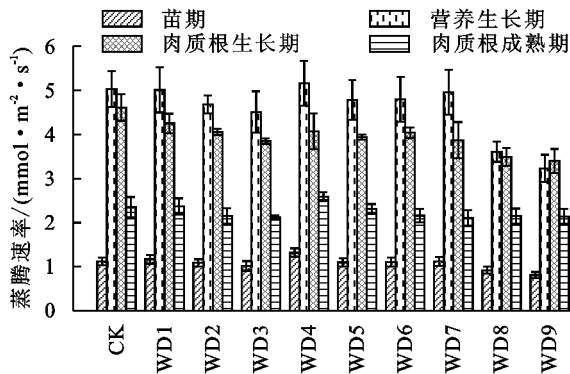


图 4 水分亏缺对菰蓝蒸腾速率的影响

2.5 菰蓝的 靛蓝、靛玉红、(R,S)一告依春含量

在菰蓝的营养生长期和肉质根生长期的水分亏缺对靛蓝、靛玉红和(R,S)一告依春的含量均有所影响(表 2)。水分调亏处理靛蓝含量影响表现为处理 WD4、WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,分别增加 5.7%,9.1%,5.3%和 4.8%;其余处理 WD2、WD3、WD8 和 WD9 均比对照组 CK 降低,分别降低 0.4%,6.2%,6.3%和 6.6%。水分调亏处理靛玉红含量影响表现为处理 WD4、WD5、WD6 和 WD7 均比对照组 CK 增加,分别增加 0.3%,5.3%,1.6%和 1.5%,其余处理 WD2、WD3、WD8 和 WD9 均比对照组 CK 降低,而且 WD3、WD8 和 WD9 的降低差异显著;水分调亏处理对(R,S)一告依春含量影响表现为在营养生长期重度水分亏缺处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8、WD9 处理的(R,S)一告依春含量较对照处理减少 8.59%,11.97%和 13.23%,与 CK(0.236 mg/g)差异显著($p<0.05$),而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于(R,S)一告依春含量的提高,处理 WD5、WD4 和 WD6 较 CK 分别增加 7.0%,5.9%和 1.6%。水分亏缺处理能够增加菰蓝中有效成分含量,提高菰蓝品质,各处理有效成分含量均达到药典标准,且随着连续生育期的中轻度水分亏缺程度的增加,菰蓝品质有所提高,但是重度水分亏缺不利于有效成分的积累。

表 2 水分亏缺对菰蓝品质影响

处理	全生育期	靛蓝/	靛玉红/	(R,S)一告依春/
	耗水量/mm	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)
CK	374.04	6.117cd	9.663c	0.237bc
WD1	343.28	6.153c	9.653c	0.230c
WD2	353.05	6.093d	9.510d	0.231bc
WD3	335.92	5.737e	8.487e	0.216d
WD4	340.85	6.463b	9.690c	0.251a
WD5	346.06	6.670a	10.173a	0.253a
WD6	338.38	6.443b	9.813b	0.240b
WD7	338.56	6.410b	9.807b	0.239bc
WD8	316.03	5.733e	8.440e	0.208de
WD9	315.27	5.713e	8.463e	0.205e

注:表中数字后不同小写字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异。

3 讨论

水分胁迫会造成叶绿素含量下降、气孔关闭、叶片淀粉水解而导致植物光合作用减慢,进而影响光合产物积累;但适时适度的水分调亏显著抑制了玉米的蒸腾速率,而光合速率下降不明显,光合产物具有超补偿积累,且有利于向籽粒分配^[11]。裴冬等^[12]研究发现,水分胁迫使作物光合速率的峰值提前出现,这有助于胁迫处理的作物利用有限的土壤水分,且蒸腾速率比光合速率对水分胁迫的反应更为敏感,更易受气孔调节的影响。罗永忠等^[13]对紫花苜蓿研究表明,水分胁迫均能降低其叶水势、蒸腾速率和气孔导度,并且随着水分胁迫程度加剧越明显。崔秀妹等^[14]研究了水分胁迫条件下对扁蓿豆光合作用和品质的影响,发现干旱降低了扁蓿豆的光合能力。本研究表明,菰蓝营养生长期和肉质根生长期重度水分亏缺处理(WD3、WD8、WD9)对菰蓝净光合速率、气孔开度和蒸腾速率负面影响最大,这与学者高阳等^[15]、王海珍等^[16]的研究结果相符合,重度水分胁迫的冬小麦光合速率和蒸腾速率则降低较为明显,重度干旱对灰胡杨叶片光合系统造成了不可逆的伤害,严重抑制了其正常生长和光合作用。然而菰蓝的营养生长期和肉质根生长期的轻度水分亏缺处理(WD1、WD4、WD5)对其光合作用影响不显著,且在复水后菰蓝叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度则均有所增大。本研究中对菰蓝不同生育期进行轻度、中度和重度水分亏缺,结果表明中度和重度水分亏缺抑制菰蓝光合作用。这是由于水分亏缺使细胞壁坚固,复水后难以恢复,从而导致生物量减产;但是如果土壤水分含量高,则导致土壤通气性差,造成主根长度缩短且侧根数增多,菰蓝的药用价值降低;土壤水分含量过少则使根系木质化程度加深,同样不利于根系生长,所以适时适量的进行水分供给才能有效提高菰蓝的产量,同时提高其品质。由于菰蓝生长到一定阶段后其外部形态基本不变,主要表现为肉质根生长,该时

期会肉质根缓慢增粗,营养生长期和肉质根生长期处于细胞快速增殖时期,生理需水十分迫切,此时水分亏缺会抑制细胞分裂而造成减产,所以在肉质根生长期的水分也很重要。因此,营养生长期和肉质根生长期是菘蓝需水关键期,该生育期内水分亏缺显著影响作物生长过程,可抑制菘蓝株高、地上生物量、肉质根的生长。

中药材品质受多因素影响,如产地、品种、土壤生态环境及栽培措施等,其中次生代谢产物是药材中有效成分,次生代谢不同于初生代谢需要良好的生长环境。有研究表明,植物在逆境胁迫如干旱、低温条件下次生代谢产物积累旺盛^[17],通过积累大量的次生代谢产物来提高抗逆性^[18]。本试验中通过利用水分亏缺研究水分对菘蓝品质的影响,结果表明水分亏缺均可提高菘蓝中靛蓝和靛玉红含量,且亏缺程度越高,有效成分积累越多,尤其是处理 WD5 比对照 CK 显著提高了靛蓝、靛玉红和(R,S)—告依春的含量。这主要是因为可在耐受干旱胁迫条件下,体内积累大量的光合产物,植物利用这些“过剩”的光合产物合成含碳次生代谢物,使组织中次生代谢物的含量增加,这与段飞等^[19]的研究结果基本一致。也有研究认为在菘蓝品质因收获大青叶、分解等原因降低,菘蓝中靛玉红含量收获一次、两次及三次大青叶处理比未收获大青叶处理分别降低 79.73%,43.24%,72.97%^[20]。本试验在 10 月初收获菘蓝,对大青叶未收获,因此靛蓝和靛玉红含量与收获时间也有关。不同水分亏缺处理对菘蓝的(R,S)—告依春含量影响不同,但均可以增加菘蓝中有效成分(R,S)—告依春的含量,提高菘蓝品质,各处理有效成分含量均达到药典标准。在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏的处理 WD4、WD5 和 WD6 较对照 CK 均有所增加,其中以处理 WD5(R,S)—告依春的含量最高,WD4 次之并与之接近。因此,在营养生长期和肉质根生长期连续轻度水分亏缺有利于菘蓝中(R,S)—告依春含量的积累,但可能还与自身遗传因素、生态环境等有关。菘蓝中(R,S)—告依春含量除与水分有关外,可能还与自身遗传因素、生态环境等有关。可见,土壤水分含量对作物生长、品质及产量均产生影响,且影响程度及作物对水分亏缺的响应与作物生育时期和水分亏缺程度有关。

4 结论

(1)本研究表明,在肉质根生长期处理 WD1 和 WD4 在复水后净光合速率出现复水补偿效应,并且超过 CK,分别达到 19.62,19.84 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而处理 WD3 复水后,净光合速率较营养生长期有所增加,但增幅不大,并且较 CK 低 14.28%,仅为 16.05

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。结果表明菘蓝营养生长期和肉质根生长期重度水分亏缺处理(WD3、WD8、WD9)对其净光合速率、气孔开度和蒸腾速率负面影响最大,且水分亏缺程度越高,降幅越大;而营养生长期和肉质根生长期轻度水分亏缺处理(WD1、WD4、WD5)影响不显著,且在复水后菘蓝叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度则均有所增大。

(2)处理 WD4、WD5 的靛蓝、靛玉红和(R,S)—告依春含量为 6.463,6.670 mg/kg,9.690,10.173 mg/kg,0.251,0.253 mg/g,均比对照组 CK 增加,在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于(R,S)—告依春含量的提高;而重度水分亏缺的处理 WD3、WD8 和 WD9 的有效含量则有所降低。结果表明轻度和中度水分亏缺均可提高菘蓝中靛蓝、靛玉红和(R,S)—告依春含量,且亏缺程度越高,有效成分积累越多,尤其是处理 WD5 比对照 CK 显著提高了靛蓝、靛玉红和(R,S)—告依春的含量。

由此可见,在菘蓝栽培时适时、适度的调亏灌溉既能显著提高产量和水分生产效率,实现节水、高效用水的目的,又能提高菘蓝品质,对河西走廊地区菘蓝种植具有重要的意义。然而,本试验只对菘蓝两个生育期进行了调亏灌溉分析研究,而连续或交替调亏对菘蓝产量和品质的影响是否更具有优势还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Kang S Z, Shi W J, Zhang J H. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2000, 67(3): 207-214.
- [2] Savić S, Stikić R, Radović B V, et al. Comparative effects of regulated deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on growth and cell wall peroxidase activity in tomato fruits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 117(1): 15-20.
- [3] Pérez-Pérez J G, Robles J M, García-Sánchez F, et al. Comparison of deficit and saline irrigation strategies to confront water restriction in lemon trees grown in semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164(4): 46-57.
- [4] Conesa M R, García-Salinas M D, Rosa J M D L, et al. Effects of deficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality, cold storage and subsequent shelf-life[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 165(3): 344-351.
- [5] Igbaduna H E, Ramalana A A, Oiganjib E. Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru, Nigeria [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109(9): 162-169.